



Universidad
Politécnica
de Cartagena

TECNOLOGÍA MINERALÚRGICA



TEMA 9: CONCENTRACIÓN
POR GRAVEDAD (II) – LÁMINA
FLUENTE



9

CONCENTRACIÓN POR GRAVEDAD EQUIPOS DE LÁMINA FLUENTE



- 9.1. Introducción.
- 9.2. Mesas de Sacudidas (*Shaking Tables*).
- 9.3. Espirales Humphreys (*Humphreys Spirals*).
- 9.4. Canales de Puntas (*Pinched Sluices*).
- 9.5. Conos Reichert (*Reichert Cones*).
- 9.6. El Concentrador Bartles-Mozley.
- 9.7. El Concentrador de Banda Bartles.
- 9.8. Concentradores Centrífugos.



Introducción

- Estos equipos son los equipos de concentración más antiguos.
- Hoy en día se siguen empleando por su elevada eficiencia y bajos costes de operación.
- Empleo para concentrar minerales con muy elevadas densidades relativas:
 - Arenas minerales de zircón, ilmenita, rutilo y otros minerales de Ti, reciclado de metales (residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (WEEE), cobre, etc.), oro, tungsteno, cromita, tántalo, mica, barita, lavado de carbones, etc.

Tabla 1

Rango de tamaños de partícula en la alimentación (feed)	10 mm	1.0 mm 18 mesh 1000 μm	0.1 mm 140 mesh 100 μm	0.075 mm 200 mesh 75 μm	0.045 mm 325 mesh 45 μm	0.001 mm 1 μm
Concentración Gravimétrica y Clasificación por vía húmeda						
Jigs						
Espiral (Spiral)						
Mesas de sacudidas (Shaking Table)						
Separador Multi-Gravedad (Multi-Gravity)						
Separador de densidad (Density Separator)						
Hidrociclones (Hydrocyclones)						



Introducción

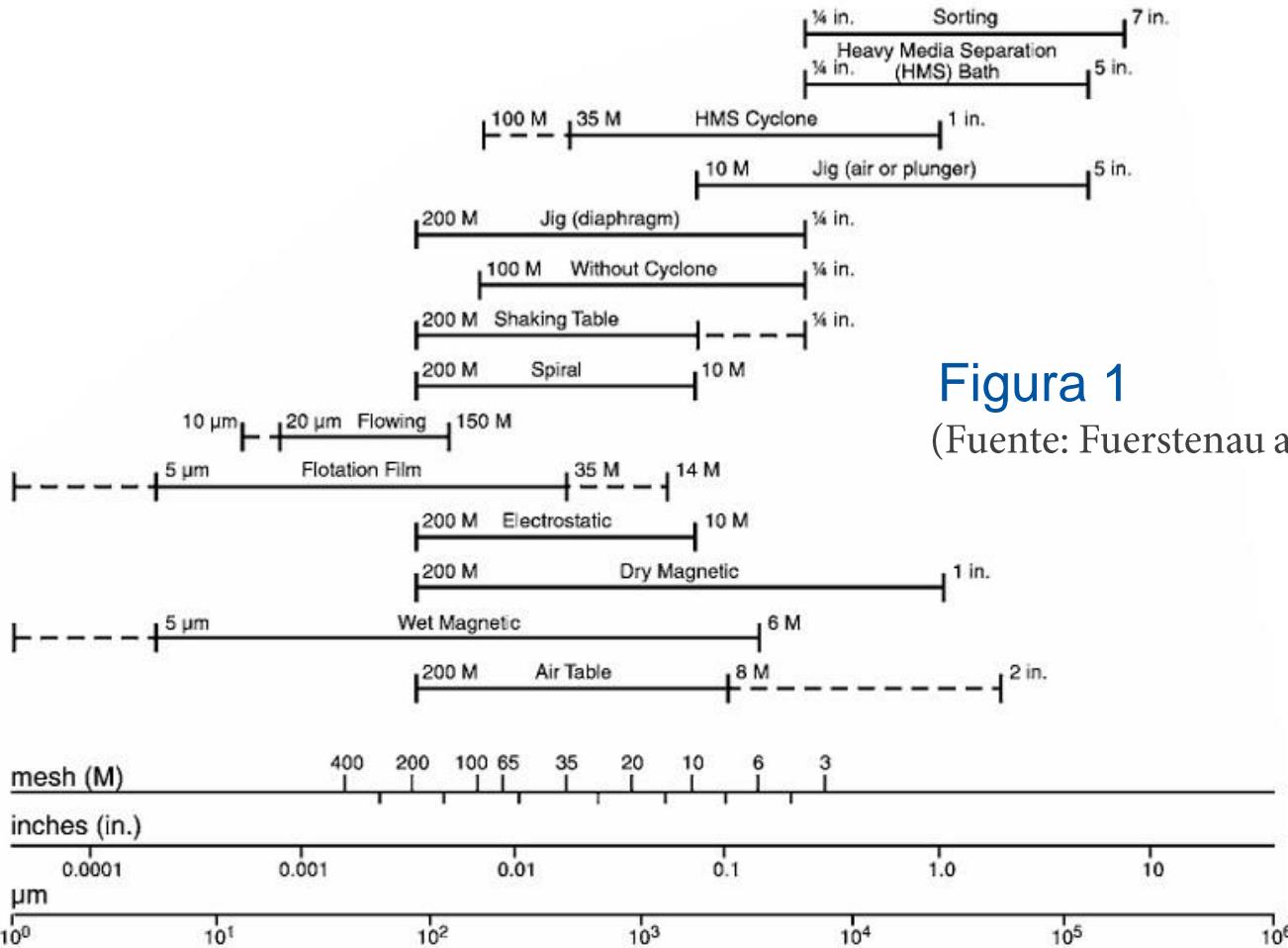


Figura 1

(Fuente: Fuerstenau and Han, 2009)

Approximate range of applicability of various concentrating devices (M = mesh, Tyler Standard)

- Rango de aplicación de los equipos de concentración gravimétrica según tamaños



Consideraciones Teóricas de la Lámina Fluyente

- El comportamiento de las partículas sólidas en una suspensión va a depender de la densidad de la pulpa y del tamaño de dichas partículas.
- En una verdadera suspensión, como aquellas que manejan partículas pequeñas, el comportamiento de las partículas viene dado por dos efectos:
 1. El desplazamiento lateral de las partículas dentro del fluido.

Trayectoria de las partículas dentro de una lámina fluyente

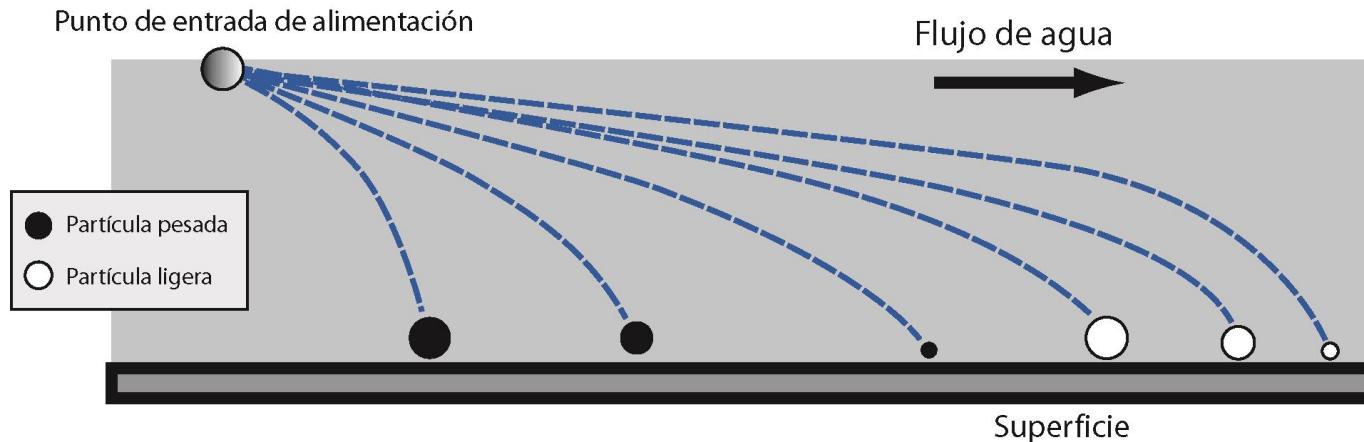


Figura 2



Consideraciones Teóricas de la Lámina Fluyente

2. La resistencia que ofrecen cada una de las partículas a desplazarse.

Tipos de fuerza sobre una partícula sumergida en régimen laminar

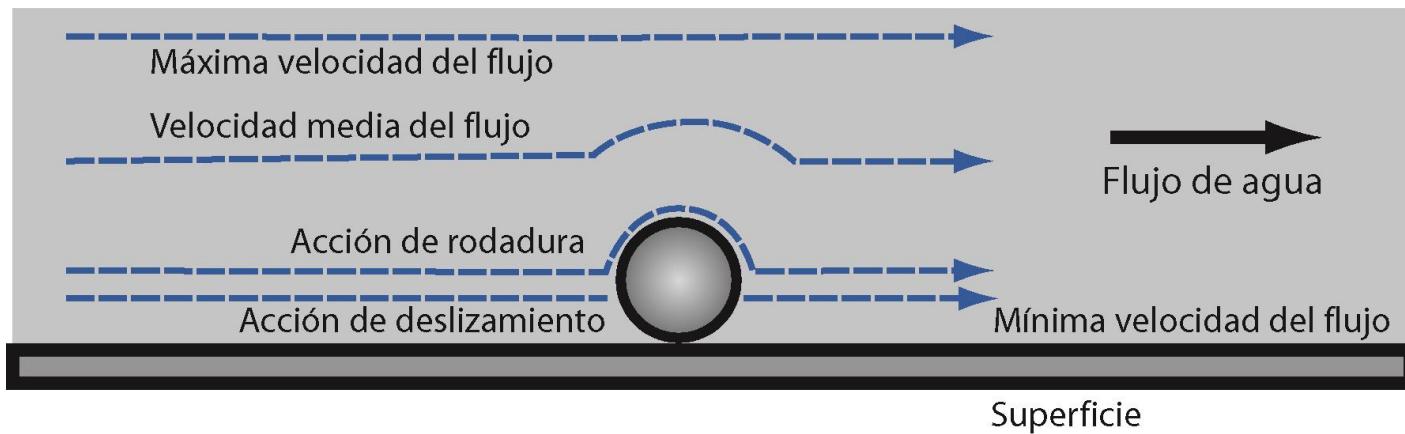
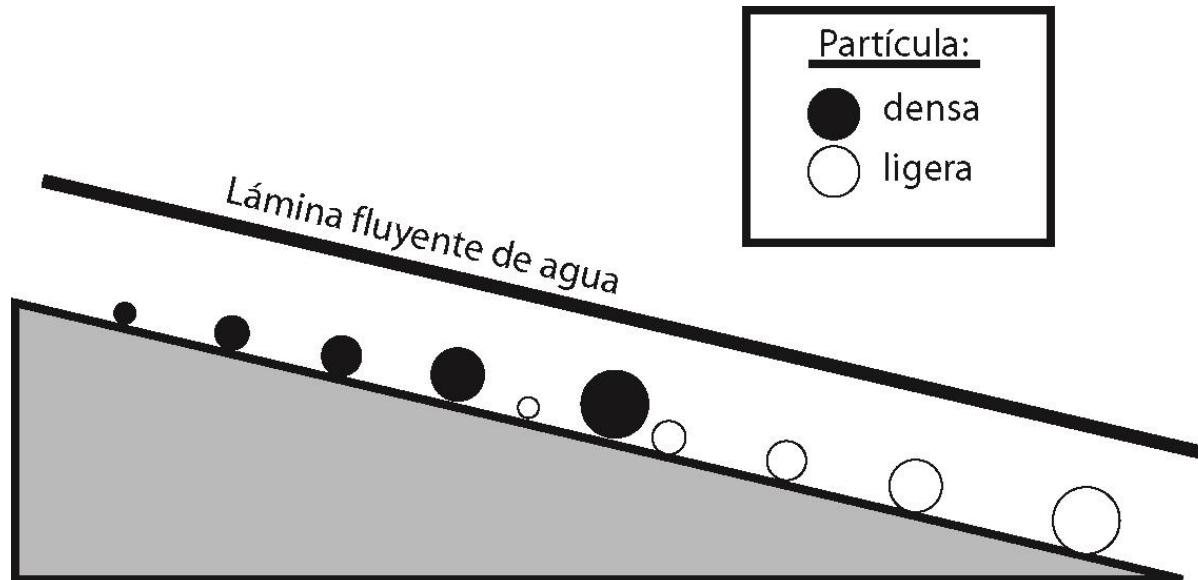


Figura 3



Consideraciones Teóricas de la Lámina Fluyente

- **Efecto conjunto bajo la influencia de la lámina fluyente.**



Distribución de partículas de diferentes tamaños y densidades
bajo la influencia de una lámina fluyente.

Figura 4

Mesas de Sacudidas (Shaking Tables)

- Consisten en un tablero plano con un movimiento alternativo de atrás hacia adelante y viceversa.
- La más conocida es la mesa de sacudidas Wilfley desarrollada en 1890 en Colorado (EEUU).



(cortesía de Holman-Wilfley)

Figura 5



Mesas de Sacudidas (Shaking Tables)

- Las primeras mesas eran movidas mecánicamente por un eje excéntrico (75 sacudidas/min).
- En la actualidad, las mesas operan con carreras de 12 – 25 mm y a 200 – 300 impactos/min.

(cortesía de Holman-Wilfley)



Figura 6

- En la actualidad se emplean para tratar partículas minerales (1.65 mm – 74 micras) o carbones (6.7 mm – 150 micras).



Mesas de Sacudidas (Shaking Tables)

- A partir de la mesa Wilfley, han aparecido otras variaciones y modelos: Garfield, Butchart, Deister-Overstrom, Campbell, Plat-O y Holman-Wilfley.

Mesa de laboratorio



(cortesía de Holman-Wilfley)

Figura 7

Reciclado de cobre



(cortesía de Holman-Wilfley)

Figura 8



Mesas de Sacudidas (Shaking Tables)

- Las mesas presentan unos **listones o largueros denominados “riffles”**.
- Estos listones o “**riffles**”, comienzan con una altura de **9.53 mm** y acaban con una altura de **1.6 mm** en la zona de concentrado final.

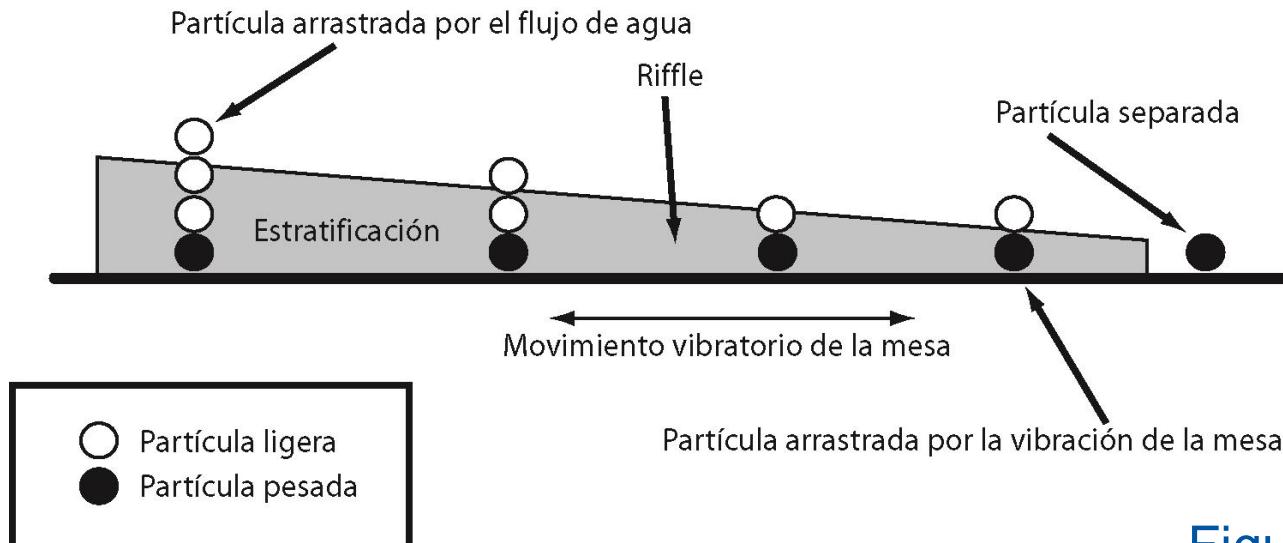


Figura 9



Principio de Operación de la Mesas de Sacudidas

- El mineral se distribuye sobre el tablero, desde el punto de alimentación, en forma de abanico.
- Avance lento – retorno rápido: favorece el movimiento diferencial de las partículas.

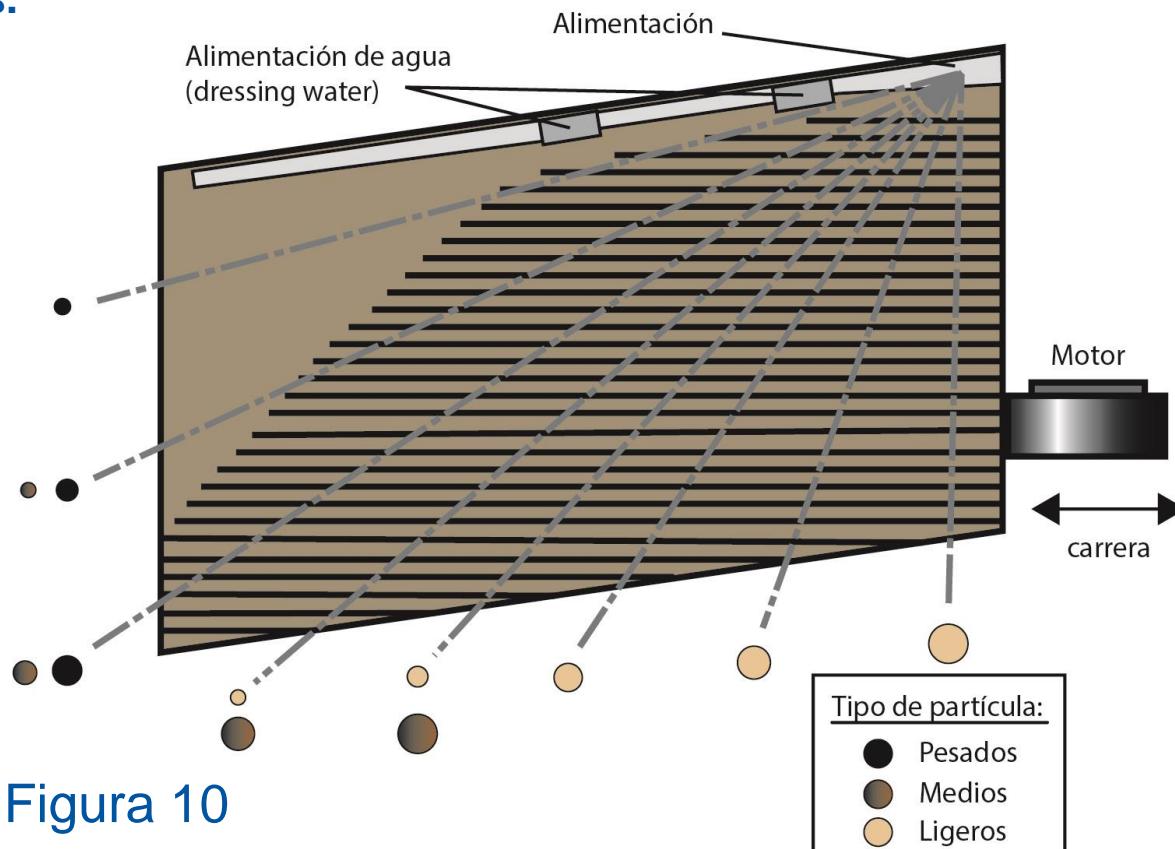


Figura 10



Principio de Operación de la Mesas de Sacudidas

- El flujo transversal del agua y el movimiento de la mesa hacen que se lleve a cabo la estratificación del mineral por densidades y tamaños.
- Además, los listones hacen que se favorezca la sedimentación obstaculizada.

Fenómenos de separación sobre una mesa de sacudidas

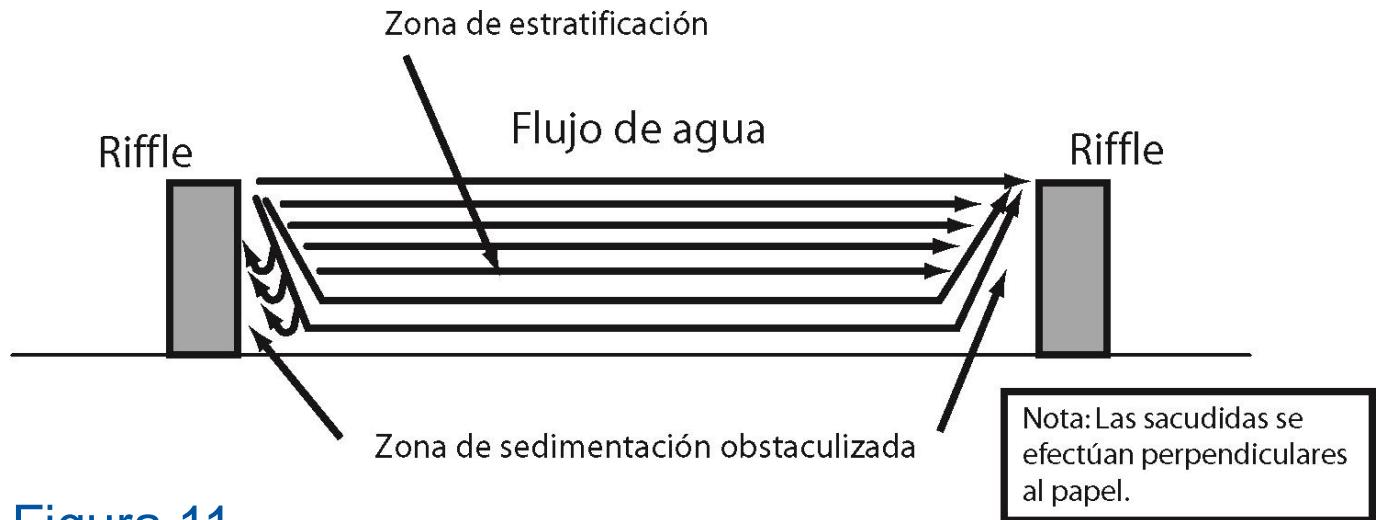


Figura 11



Tipos de Mesas

- En los primeros modelos los tableros estaban revestidos de linóleo y los listones eran de madera.
- En los modelos actuales los listones son de caucho y el tablero también es de caucho y se tiende a mesas de una sola pieza de poliuretano.

(cortesía de Gemeni Gold Tables)



Figura 12

(cortesía de Holman-Wilfley)

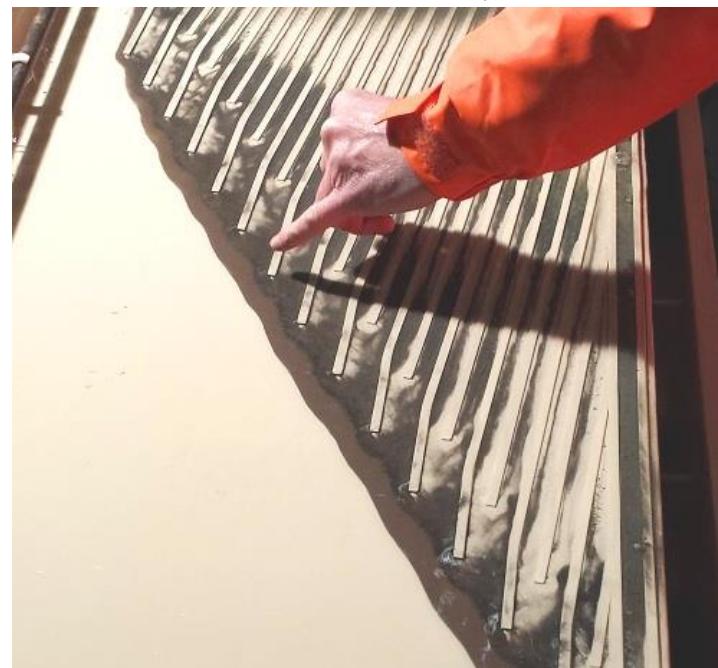


Figura 13



Factores de Operación

- **Movimiento vibrante horizontal.**
 - Carrera lenta hacia adelante y carrera rápida hacia atrás (10-25 mm).
 - 250-300 golpes por minuto.
- **Flujo de agua.**
 - 75% agua de la alimentación, 25% de agua de lavado (dressing water).
- **Pendiente de la mesa.**
 - Inclinada hacia la zona de rechazo.
 - Ligeramente elevada a lo largo de la línea de movimiento desde el extremo de la alimentación hasta el extremo del concentrado.
- **Largueros (*riffles*).**
 - Su altura y espaciado son variables importantes.
 - Obstaculizan el avance de las partículas pesadas.
- **Capacidad de tratamiento.**
 - Hasta 2 t/h tratando arenas de 1.5 mm o quizás 1 t/h con arenas finas.
 - Hasta 15 t/h con carbones (5 mm – 15 mm).

9.3. Espirales Humphreys (*Spirals*)

9.3. Espirales Humphreys (*Spirals*)

Introducción

- Los concentradores de espiral también emplean la lámina fluente.
- Consisten en un canal o artesa (troughs) de sección semicircular que describen una trayectoria helicoidal.
- Para aumentar la capacidad de tratamiento, las espirales pueden estar compuestas por uno, dos o tres canales helicoidales alrededor de la misma columna-soporte.
- Las espirales puedes estar fabricadas en configuraciones de tres, cinco, siete o más vueltas.



Figura 14

(cortesía de Multotec)



Introducción

- Comenzaron a emplearse en 1943 en el tratamiento de arenas minerales ricas en cromo.
- Actualmente se emplean para tratar arenas minerales ricas en oro, plata, estaño, ilmenita, rutilo, circón, monacita, hierro, barita, fluorespato y fosfato.
- También han tenido y tienen un importante papel en la industria del carbón para la eliminación de cenizas o pirita como ganga.
- La primera aplicación en la industria del carbón vino de la mano de la Hudson Coal Company en 1947.



Figura 15 (cortesía de Multotec)



Introducción

- Se puede recurrir a la siguiente expresión para estimar la idoneidad de estas unidades:

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{\text{partícula pesada}}}{\rho_{\text{partícula ligera}}}$$

- Según ese ratio de densidades ($\Delta\rho$) tendremos la siguiente tabla:

Valor de $\Delta\rho$	Separación
2.0	Excelente
1.5	Buena
1.1	Pobre



Figura 16 (cortesía de Multotec)



Principio de Funcionamiento

- La pulpa (*slurry*) es alimentada por la parte superior a través de los distribuidores de alimentación.
- La pulpa se ve sometida a una fuerza centrífuga.
- Las partículas más ligeras son arrastradas hacia la parte externa debido a una mayor velocidad tangencial de la lámina fluente.
- Las partículas más pesadas quedan agrupadas y clasificadas en la zona próxima al soporte central (*zona de menor velocidad de la lámina fluente*).

Figura 17

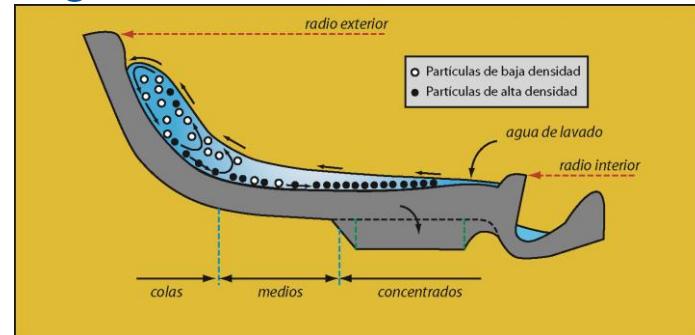


Figura 18 (cortesía de Multotec)





Principio de Funcionamiento

- **Región 1:** Zona compuesta por agua y partículas finas. No hay procesos de separación.
- **Región 2:** Zona de máxima velocidad del agua e interrumriendo la conexión entre las zonas 1 y 3.
- **Región 3:** Zona de alta velocidad tangencial de la pulpa, el agua con movimiento horario. Tiene lugar las principales acciones de separación.
- **Región 4:** Esta zona actúa de referencia de funcionamiento para los operadores de espirales.
- **Región 5:** Zona donde se concentran las partículas de mayor densidad.
- **Región 6:** Zona en la que se añade agua adicional de lavado (washwater) para eliminar partículas ligeras de la zona de concentrado.

Figura 19

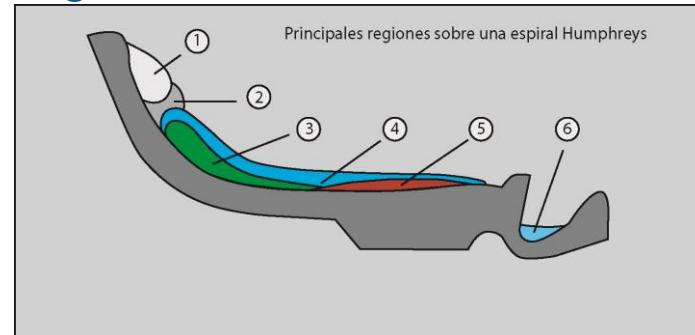


Figura 20 (cortesía de Multotec)





Principio de Funcionamiento

- **Región 1:** Zona compuesta por agua y partículas finas. No hay procesos de separación.
- **Región 2:** Zona de máxima velocidad del agua e interrumriendo la conexión entre las zonas 1 y 3.
- **Región 3:** Zona de alta velocidad tangencial de la pulpa, el agua con movimiento horario. Tiene lugar las principales acciones de separación.
- **Región 4:** Esta zona actúa de referencia de funcionamiento para los operadores de espirales.
- **Región 5:** Zona donde se concentran las partículas de mayor densidad.
- **Región 6:** Zona en la que se añade agua adicional de lavado (washwater) para eliminar partículas ligeras de la zona de concentrado.

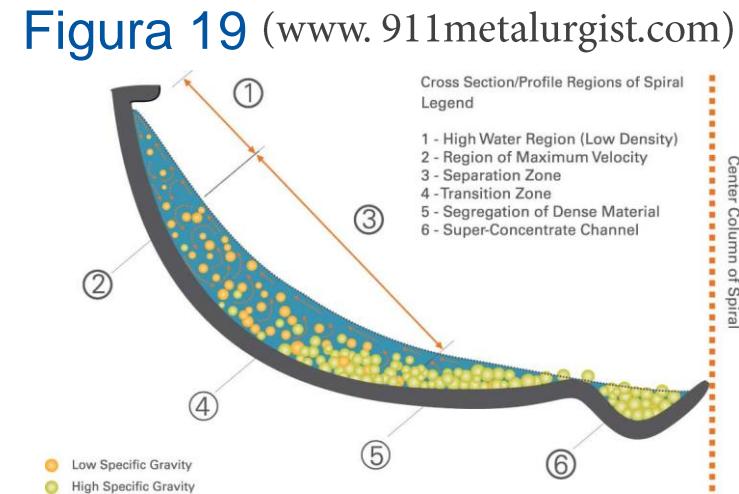


Figura 19 (www.911metallurgist.com)



Figura 20 (cortesía de Multotec)



Parámetros de Operación

- Manejan un amplio rango de tamaños entre 3 mm y 75 μm para minerales (1.2 mm y 150 μm para carbones).
- Las capacidades varían entre 1 y 4 t/h de mineral. En el tratamiento de carbones pueden alcanzar las 5 t/h.
- La pulpa se caracteriza por contener entre un 15% y un 45% de sólidos en peso (25 – 40% de sólidos para el carbón).

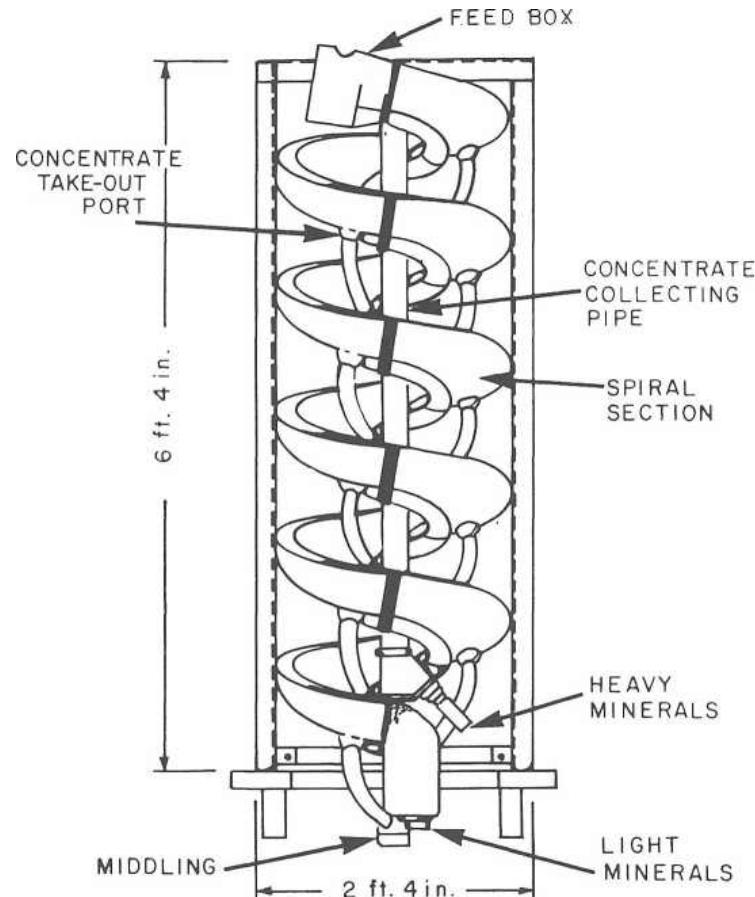


Figura 21

(Wills, 1984)



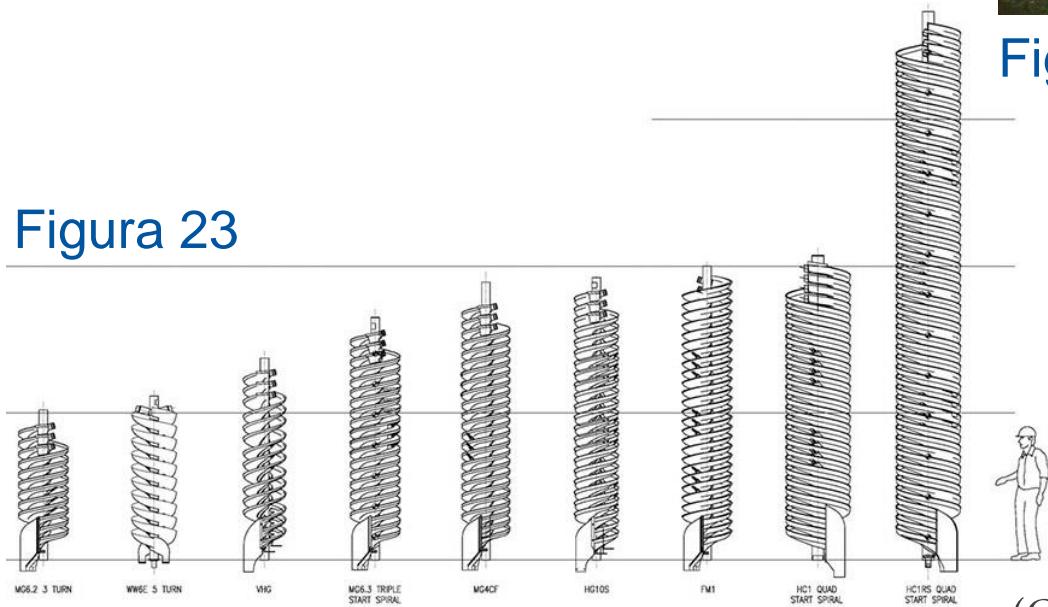
Diseño de las Unidades

- La artesa presentará unos orificios donde son recogidos los concentrados.
- Existen equipos donde presentan separadores (*splitters*) en la parte inferior y es donde se lleva a cabo la separación.



Figura 22 (Cortesía de Multotec)

Figura 23



(Cortesía de Mineral Technologies)



Diseño de las Unidades

- Inicialmente se fabricaban de hierro fundido e incluso de hormigón.
- En la actualidad se fabrican de fibra de vidrio con revestimiento de poliuretano o caucho.



Figura 24 (Cortesía de Multotec)

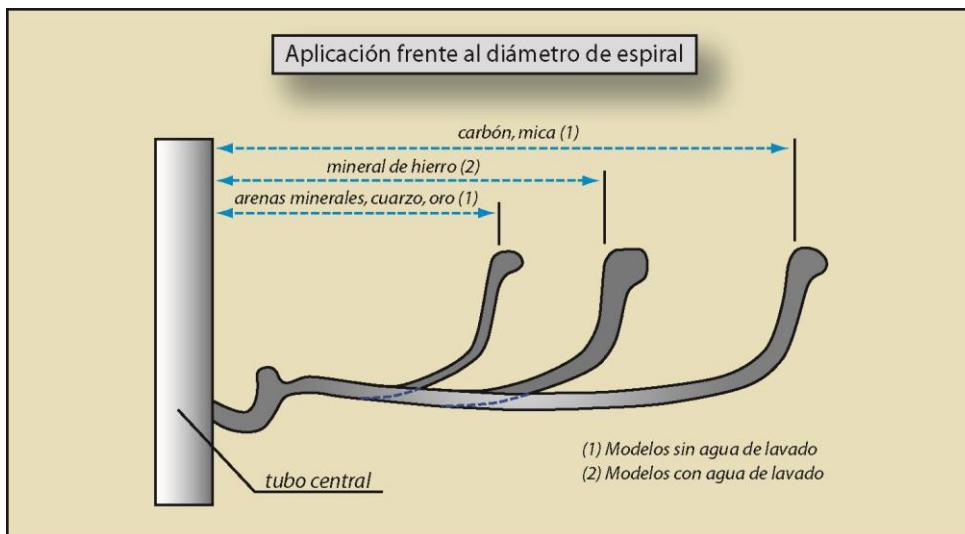


Figura 25

9.4. Canales de puntas (*Pinched Sluices*)



9.4. Canales de puntas (*Pinched Sluices*)

Introducción

- Son los equipos más simples y antiguos.
- Los primeros equipos eran simples canales de madera o artesas de 30 cm a 3 m de ancho, de 15 cm a 1.2 m de profundidad.
- Sobre el fondo de estos equipos se instalaban todo tipo de obstáculos para retener y atrapar las partículas pesadas (oro).
- Estos obstáculos estaban constituidos por listones de madera, piedras, etc., constituyendo los *riffles*.
- En el sudeste asiático se les conoce como “palongs” para la concentración de casiterita, ilmenita, monacita y circón.



Figura 26

(www.scvhistory.com)

9.4. Canales de puntas (*Pinched Sluices*)



9.4. Canales de puntas (*Pinched Sluices*)

Introducción

- Son los equipos más simples y antiguos.
- Los primeros equipos eran simples canales de madera o artesas de 30 cm a 3 m de ancho, de 15 cm a 1.2 m de profundidad.
- Sobre el fondo de estos equipos se instalaban todo tipo de obstáculos para retener y atrapar las partículas pesadas (oro).
- Estos obstáculos estaban constituidos por listones de madera, piedras, etc., constituyendo los *riffles*.
- En el sudeste asiático se les conoce como “palongs” para la concentración de casiterita, ilmenita, monacita y circón.



Figura 27

(www.iStock.com)

9.4. Canales de puntas (*Pinched Sluices*)



9.4. Canales de puntas (*Pinched Sluices*)

Introducción

- Son los equipos más simples y antiguos.
- Los primeros equipos eran simples canales de madera o artesas de 30 cm a 3 m de ancho, de 15 cm a 1.2 m de profundidad.
- Sobre el fondo de estos equipos se instalaban todo tipo de obstáculos para retener y atrapar las partículas pesadas (oro).
- Estos obstáculos estaban constituidos por listones de madera, piedras, etc., constituyendo los *riffles*.
- En el sudeste asiático se les conoce como “palongs” para la concentración de casiterita, ilmenita, monacita y circón.

Figura 28



(www.fineartamerica.com)

Figura 29



(www.pinterest.com)



Principio de Operación

- Los canales de puntas son simples canalones en los que las paredes sufren un estrechamiento.
- Las partículas perfectamente estratificadas son separadas por los cortadores de flujo o “*splitters*”, permitiendo una descarga continua del concentrado.
- Para una concentración eficiente se disponen los canales solapados y en cascada para que las partículas tengan más posibilidades de estratificarse y poder recuperar los minerales valiosos.

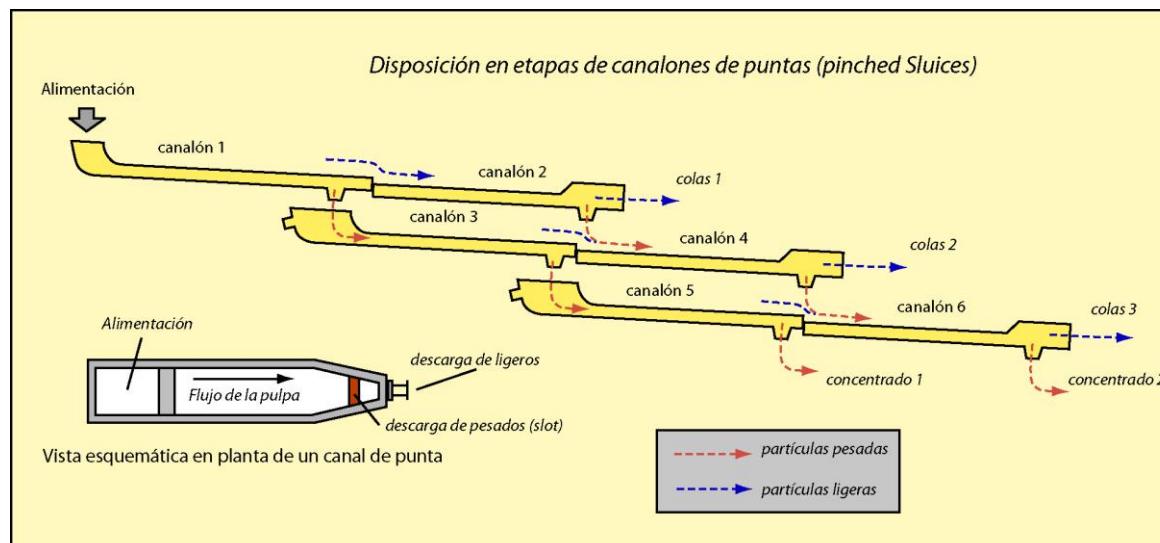


Figura 30

9.5. Conos Reichert (Cones)



9.5. Conos Reichert (Cones)

Introducción

- Es un concentrador gravimétrico de alta capacidad.
- Su desarrollo comienza en 1960 en Australia.
- Se emplea fundamentalmente en la concentración de minerales de titanio y circón.
- Son unidades de construcción simple sin partes mecánicas móviles (costes bajos de mantenimiento y adquisición).
- Actualmente se construyen de fibra de vidrio o de caucho y con separadores de flujo (splitters).

Figura 31



(Cortesía de Reichert Cones)



Introducción

- Su uso se ha extendido para aplicarse en otros tipos de arenas minerales de placeres.
- **Minerales de hierro, estaño, tungsteno y oro.**
- Se compone de varias secciones de cono apiladas para favorecer las operaciones de concentración de las partículas densas.
- Estarán formadas por unidades de conos dobles (D) o simples (S) con su correspondiente adaptador cónico para distribuir.

Figura 32



(Cortesía de Reichert Cones)

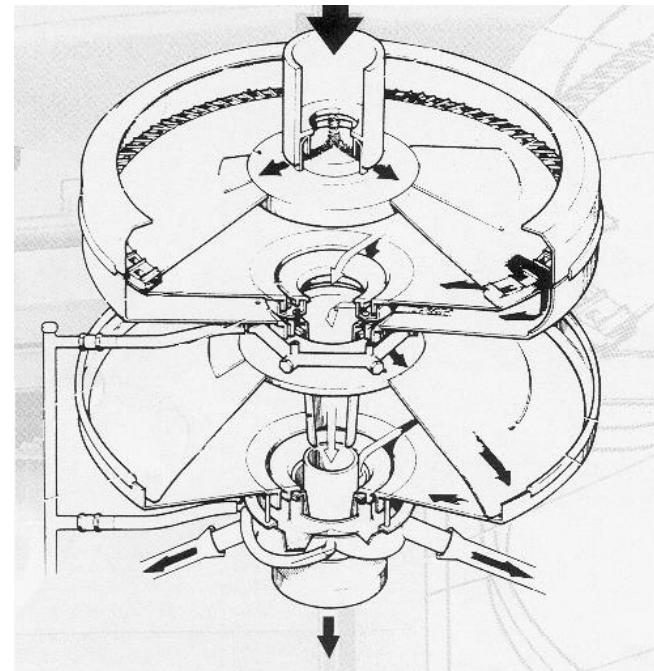


Figura 33

(Cortesía de Reichert Cones)



Principio de Operación

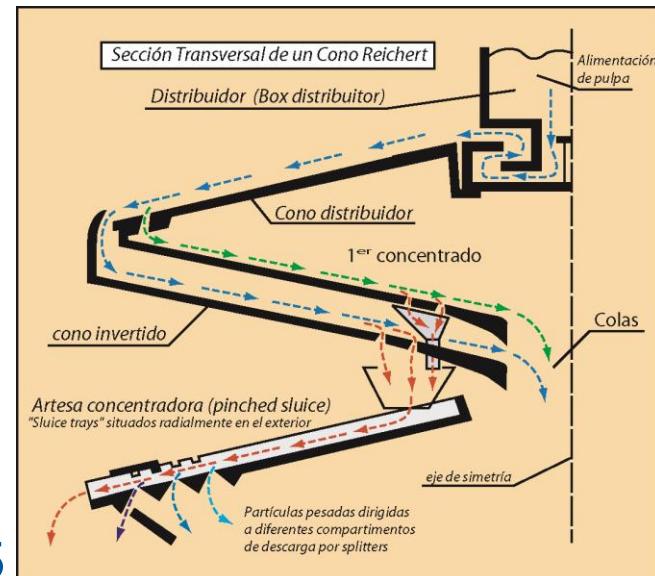
- Manejan partículas con tamaños inferiores a los 2 mm y que pueden llegar a las 30 μm .
- La pulpa se caracteriza por un contenido de sólidos entre el 60-65%.
- Se alimenta por la parte superior donde el cono distribuidor distribuye la pulpa por toda su superficie.
- El mecanismo de separación es una combinación de sedimentación obstaculizada, percolación intergranular y lamina fluyente.

Figura 34



(Cortesía de Reichert Cones)

Figura 35





Diseño de las Unidades

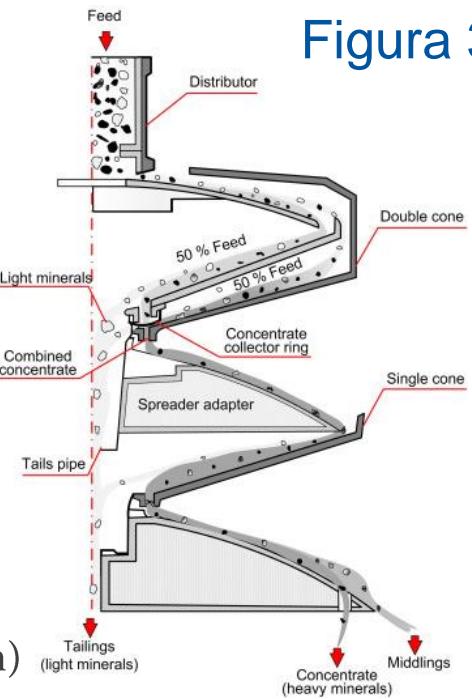
Figura 36

- Estas unidades se suministran con diámetros entre 2 y 3.5 m.
- Las capacidades varían entre 50 y 90 t/h.
- Los equipos se ensamblan con apilamientos de diferentes configuraciones de conos (platos dobles o simples).

(Cortesía de Reichert Cones)



Figura 37



9.6. Concentrador Bartles-Mozley

9.6. Concentrador Bartles-Mozley

Introducción

- Es un desarrollo avanzado de las mesas basculantes (“*tilting frames*”).
- Se emplea para separación gravimétrica fina (5 y 70 μm), aunque es más eficiente en el rango de 10 a 50 μm . Las partículas más grandes que ha tratado han sido de 150 μm .
- El equipo se basa en las propiedades de la lámina fluyente.

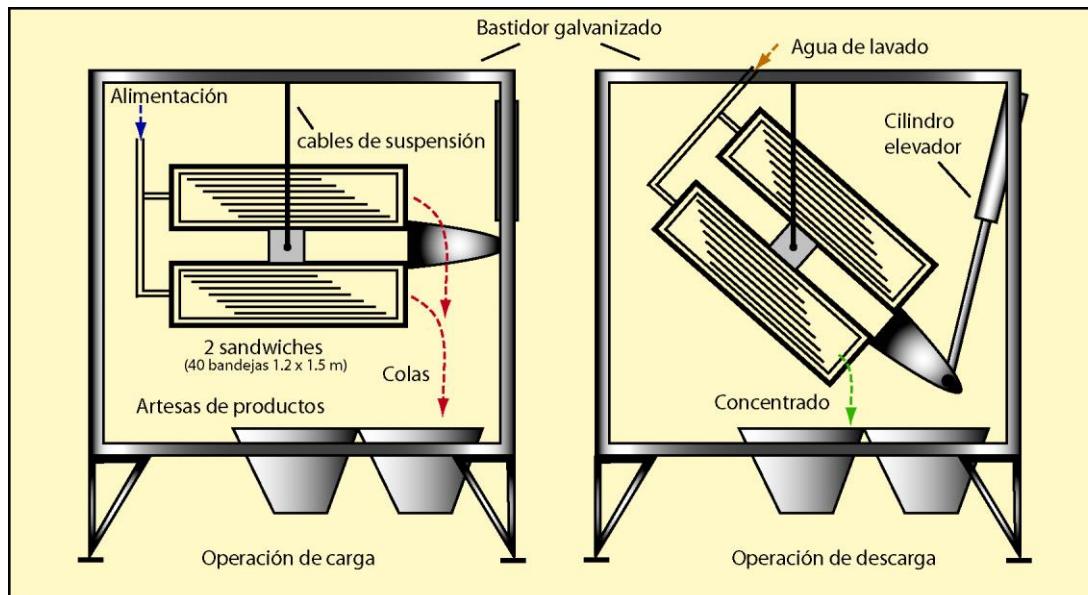


Figura 38

(Funcionamiento de un concentrador Bartles-Mozley)



Principio de Funcionamiento

- Está formado por un bastidor de acero galvanizado que soporta el apilamiento de dos bancadas de 20 bandejas cada una de fibra de vidrio y con su superficie lisa.
- Las bancadas están suspendidas de cables y presentan una ligera inclinación (1° - 4°).
- Se les imprime un movimiento vibratorio a las bandejas.

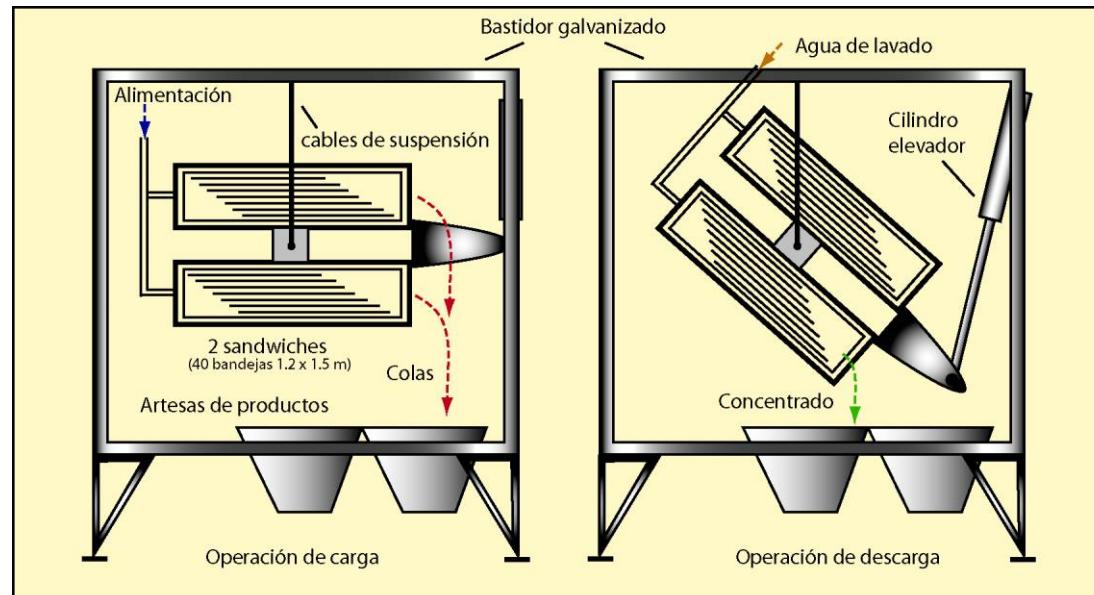


Figura 38

(Funcionamiento de un concentrador Bartles-Mozley)



Principio de Funcionamiento

- La pulpa es alimentada con un contenido entre 5 y 15% de sólidos durante 15 minutos.
- Pasado ese tiempo las bandejas se inclinan a 45º para recoger el concentrado.
- Su empleo fundamental es el mineral de casiterita, recuperación de mineral fino de los antiguos depósitos de estériles provenientes de flotación (Pb, Zn y Cu).

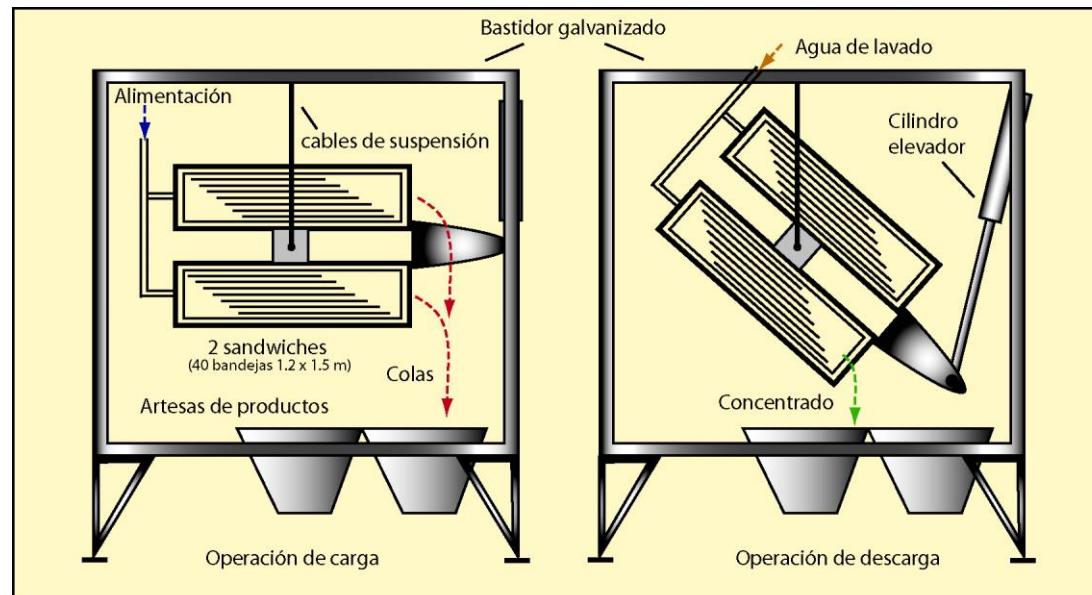


Figura 38

(Funcionamiento de un concentrador Bartles-Mozley)

9.7. Concentrador de banda Bartles

9.7. Concentrador de banda Bartles

Introducción

- Este equipo se desarrolló para enriquecer los concentrados provenientes del equipo Bartles-Mozley.
- Es un desarrollo posterior de los “vanners” (descritos por Taggart).
- Consiste en un separador de banda sin fin de PVC de 2.4 m de ancho. La banda está ligeramente inclinada y está sometida a vibración.

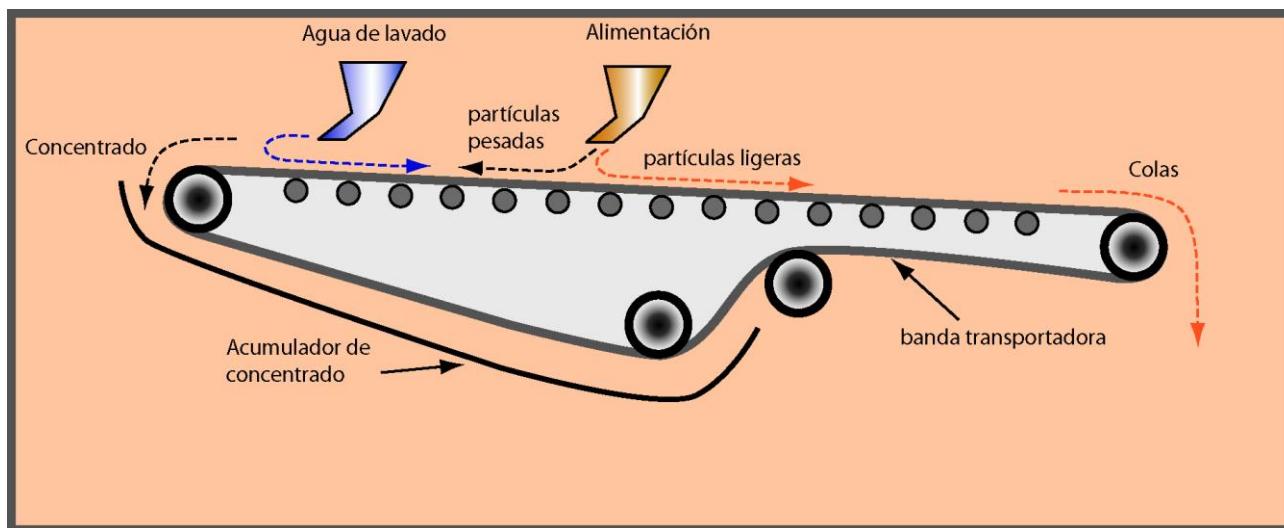


Figura 39

(Corte esquemático de un concentrador Bartles)

9.8. Concentradores Centrífugos



9.8. Concentradores Centrífugos

Introducción

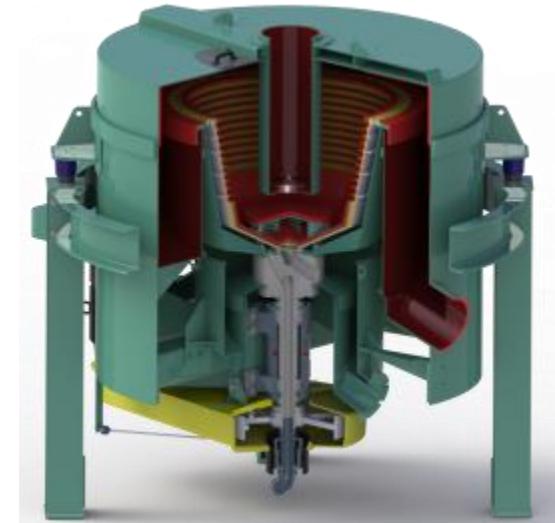
- Desde 1980 han ido apareciendo e imponiéndose equipos de concentración gravimétrica que hacen uso de los efectos de la lámina fluente y de la acción centrífuga.
- Recuperan partículas con tamaños inferiores a $6 \mu\text{m}$.

Figura 40



(Cortesía FLSmidth-Knelson)

Figura 41



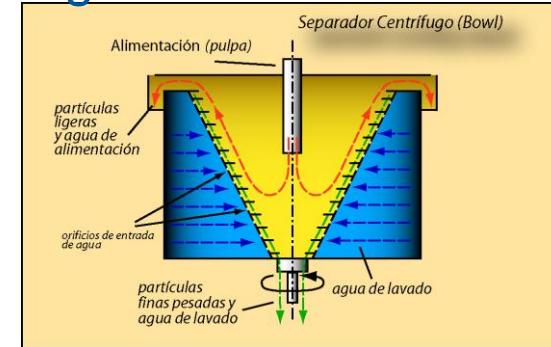
(www.im-mining.com)



Unidades Centrífugas de Eje Vertical (Bowls)

- Llevan años empleándose en el tratamiento de las arenas aluviales metalíferas instaladas en unidades de dragado.
- Están formados por un tazón troncocónico de diámetro superior a 91 cm y que gira a 400 rpm.
- Estos giros ejercerán sobre las partículas fuerzas gravitatorias de 60 g's.
- La pared interna del tazón presenta un estriado (rifles) para obstaculizar y retener en su avance a las partículas densas.
- Las partículas ligeras se descargan por la parte superior del tazón, mientras que las partículas pesadas se recogen por la parte inferior en la fase de lavado con ayuda de inyección de agua (alimentación interrumpida).

Figura 42



(Knelson - www.labris.com.tr)



Figura 43



Unidades Centrífugas de Eje Vertical

- En los últimos años se han desarrollado unidades que permiten la operación de concentración o recuperación de forma ininterrumpida.
- Estas nuevas unidades presentan una mejora en el diseño de las estrías o anillos internos.
- Equipos comercialmente conocidos son los suministrados por Knelson y Falcon.
- Al igual que todos los equipos de separación gravimétrica su uso se encuentra en la recuperación de partículas densas procedentes de la extracción de oro aluvial, tratamiento de residuos de estériles, recuperación de partículas finas de carbón, etc.

Figura 44

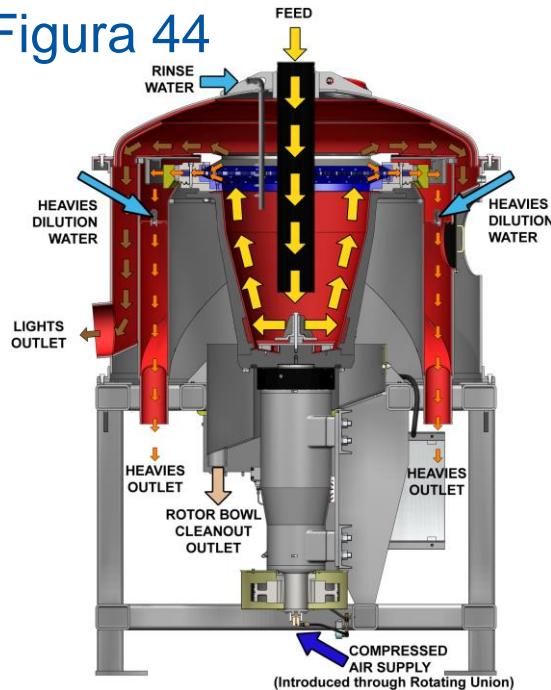


Figura 45



(Cortesía de Falcon Concentrators)



Multy-gravity separator (MGS) de Mozley

- Son unidades caracterizadas por un tambor con una ligera inclinación de 0º a 9º con velocidad de giro entre 100 y 280 rpm.
- Esta velocidad de giro somete a las partículas a fuerzas centrífugas de 15 g's.
- En el interior del tambor hay dispuestas 4 barras longitudinales equipadas con 9 rascadores pequeños (65 mm) o scrapers (depende del modelo).
- Estos rascadores rasparán la superficie interior del tambor ligeramente para desplazar las partículas densas hacia el punto de descarga de concentrados.
- Se añade agua de lavado cerca del extremo abierto del tambor que favorecerá el arrastre de las partículas ligeras y su retirada por la descarga de colas o ganga.

Figura 46



(Cortesía de Axsia Mozley)

Figura 47



(Cortesía de Axsia Mozley)

Figura 48



(Cortesía de Salter Cyclones)



Multy-gravity separator (MGS) de Mozley

- A los tambores se le imprime una vibración de entre 4 y 6 cps.
- Mozley suministra modelos de varios tamaños desde modelos de laboratorio hasta modelos como el MeGaSep de 9600 x 2900 mm.

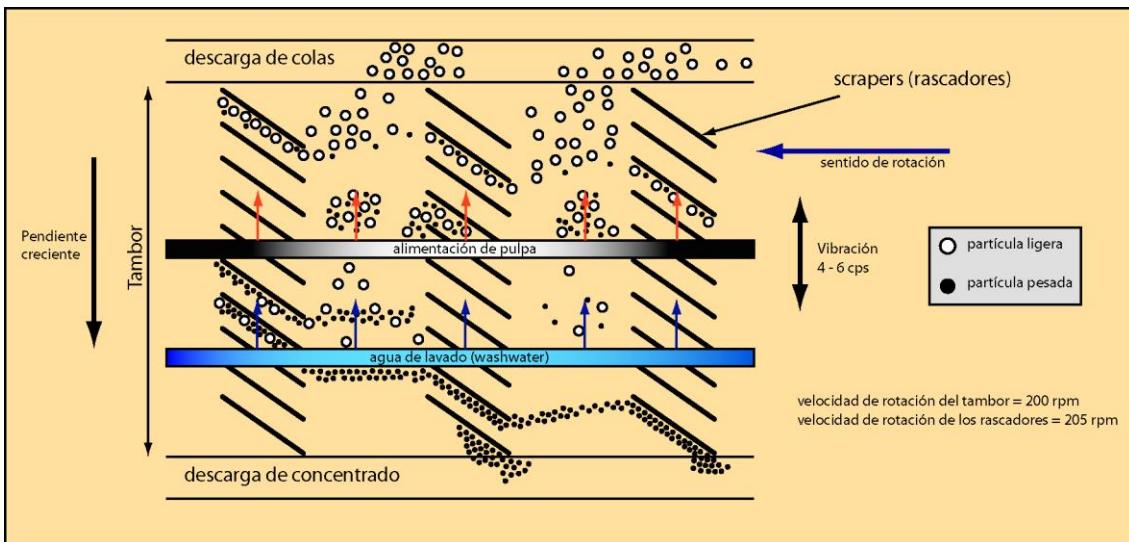
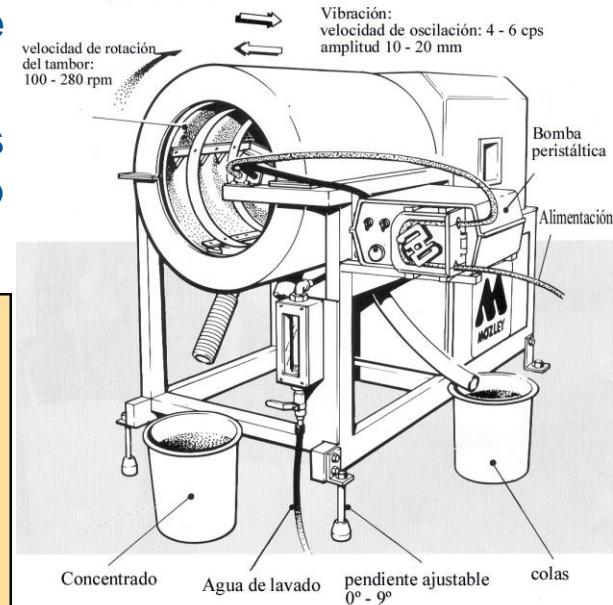


Figura 50

Figura 49

Multi-G Separator C900 (Mozley)



(Cortesía de Axsia Mozley)



Figura 51

Referencias:

